

适应弯扭隔肋的涡轮叶片转接段建模方法

陈 洋¹, 赵晓慈¹, 席 平¹, 徐景亮²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110000)

[摘要] 针对涡轮冷却叶片弯扭冷却通道转接段的特点, 提出了关联的转接段建模方法, 通过曲线网格法生成工具片体裁剪叶身内型实体得到转接段, 并以此为基础完成转接段建模, 满足转接段与弯扭隔肋 G^1 光滑转接的要求。详细分析了该方法的原理; 提取了关键参数; 利用 UG (Unigraphics NX) 二次开发平台开发了转接段的参数化建模模块, 实现了适应弯扭隔肋的转接段建模。

关键词: 涡轮叶片; 转接段; 关联; UG 二次开发; 弯扭隔肋

Transition Section of Turbine Blade Modeling Method Fitting Bowed-Twist Wall

CHEN Yang¹, ZHAO Xiaoci¹, XI Ping¹, XU Jingliang²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110000, China)

[ABSTRACT] Considering the geometric features of the transition section in a bowed-twist cooling passage of the turbine blade, a correlation modeling method was presented. The transition section was obtained by trimming the inner part of the blade body with the tool piece, and then conducted modeling of transition section. The G^1 continuity requirements for the transfer section and the ribs are met. The principle of the method was deeply analyzed, and the automatic recognition algorithm of the rib edge was proposed. The key parameters and the constraint condition were extracted. Eventually, the parametric design module of the transfer section was developed based on UG Open API, which achieved transition section modeling.

Keywords: Turbine blade; Transition section; Correlation modeling; UG Open API; Bowed-twist wall

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.078

随着航空发动机性能的提升, 涡轮进口温度越来越高, 已远高于叶片高温合金材料的耐受温度, 如目前先进的军用发动机的前进口温度已经达到了 2000K 量级, 而高温耐受合金的工作温度为 1300~1400K^[1]。为了保证发动机工作的可靠性, 现代涡轮叶片普遍采用内流冷却和气膜冷却的混合冷却方式^[2]。冷却通道是内流冷却的载体, 转接段作为连接冷却通道的重要特征, 对冷却气体流动和强化换热起重要作用。

为精细组织冷却气体, 增强气体对叶片的冷却效果, 弯扭隔肋被用来优化冷却通道的布置^[3], 与此同时适应弯扭隔肋的转接段快速建模方法也要与之相适应。目前设计人员主要通过试凑、拼接的方法建立转接段 CAD 模型进行 CAE 分析, 根据 CAE 分析结果修改 CAD 模型再进行 CAE 分析, 直至该 CAD 模型达到

设计指标, 这是一个反复迭代的过程。在此过程中实现 CAD 模型的快速修改是提高设计效率的关键, 因此研究 CAD 模型的关联参数化建模方法具有重要意义。张宝源等^[4]研究了涡轮弯扭叶片尾缝的快速建模技术, 提出了尾缝工具体和尾缝窗口的快速建模方法。李吉星等^[5]提出了一种创成式导管参数化建模方法, 实现了气冷叶片复杂特征导管的快速建模。Pérez-Arribas 等^[6]提出了使用叶片几何形状的通用的设计参数, 构造 B 样条曲面对风机叶片进行建模的方法。朱谦等^[7]提出了适应直隔肋的冷气通道转接段 G^1 光滑拼接的参数化建模方法, 但此方法存在以下缺点: (1) 不能较好地适应弯扭隔肋, 由于弯扭隔肋同时存在弯、扭两种状态, 隔肋侧面不再是平面而成为自由曲面, 此方法生成的工具片体将与基体相交, 无法完成裁剪或裁剪后不满足 G^1 光

滑转接的要求；(2)转接段与叶身不关联,当叶身发生变更时,转接段不能自动与叶身变更相适应。

因此,本文提出采用关联设计技术,通过曲线网格法生成工具片体裁剪基体(已建立隔肋的叶身内型实体)创建转接段的方法。首先对转接段的几何特点及设计特征进行分析,归纳转接段建模的要求,提出转接段建模的整体方案并对转接段建模方法及相关问题进行讨论,最后在UG平台上开发了转接段的参数化建模模块,验证了该方法的可行性。

1 涡轮冷却叶片转接段特征分析

叶身内流冷却通道由隔肋分割叶身内腔形成,转接段把冷却通道相互连接起来。冷气从涡轮叶片的底部进气口进入叶身内腔,依次通过冷却通道,有效冷却叶片内表面,最终冷气从叶身气膜孔、尾缝和顶部盖板的排气孔中排出。弯扭冷却通道可以增加冷却气体在叶身内腔中的流动时间,增大冷气与叶身内腔的接触面积,提高冷却效果。叶身结构如图1(a)所示,冷却通道结构如图1(b)所示。

转接段作为叶身内腔的复杂特征,一般根据“反阴为阳”的方法,用叶身外型实体减去叶身内型实体得到叶身内腔中的转接段。转接段把两个冷却通道光滑连接起来,从一个隔肋的侧面过渡到一个隔肋的侧面,其截面形状通常为圆弧状。而隔肋特征可以看作由4张曲面拼接而成(图2),对任一隔肋特征定义:靠近叶身前缘的隔肋面为 F_1 面,靠近叶身后缘的隔肋面为 F_2 面,靠近涡轮中心轴线的隔肋面为 F_3 面,远离涡轮中心轴线的隔肋面为 F_4 面。隔肋的 F_1 、 F_2 面又称为隔肋侧面,隔肋侧面由4条边组成。对一个隔肋侧面(即 F_1 或 F_2 面)定义:靠近叶盆的隔肋边为 L_1 ,靠近叶背的隔肋边为 L_2 ,靠近涡轮中心轴线的隔肋边为 L_3 ,远离涡轮中心轴线的隔肋边为 L_4 。

通过以上分析,归纳出转接段的建模要求如下:(1)转接段两侧要与弯扭隔肋的侧面(即 F_1 或 F_2 面)满足 G^1 光滑转接;(2)叶盆、叶背为自由曲面,转接段前后表面要为叶盆和叶背表面的自然延伸;(3)转接段能够与基体(已建立隔肋的叶身内型)相关联,当基体变更时,转接段能够实时更新。

为实现上述建模要求,本文设计了适应弯扭隔肋的涡轮冷却叶片转接段的快速建模方法,其整体方案如图3所示。

将关联的具有完备约束的工具片体截面线作为原始曲线,与隔肋侧面具有位置和切矢的连续性关系的引导线作为横截面曲线,构造曲线网格,使放样生成的工具体面与曲线网格相匹配,实现转接段与隔肋侧面光滑

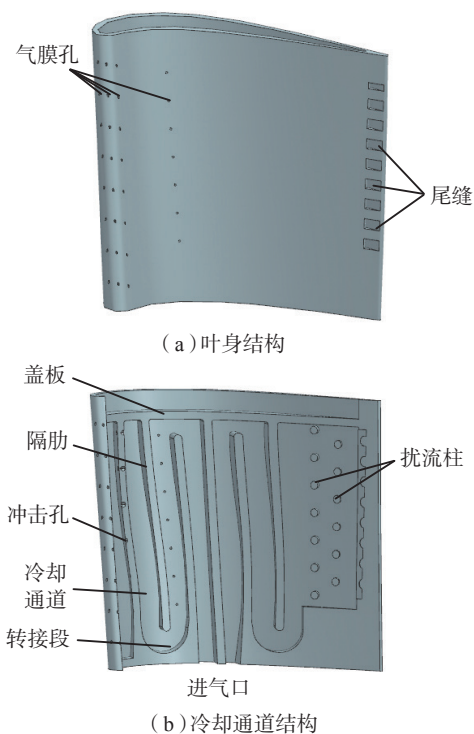


图1 叶身及冷却通道结构

Fig.1 Blade body structure and cooling channel structure

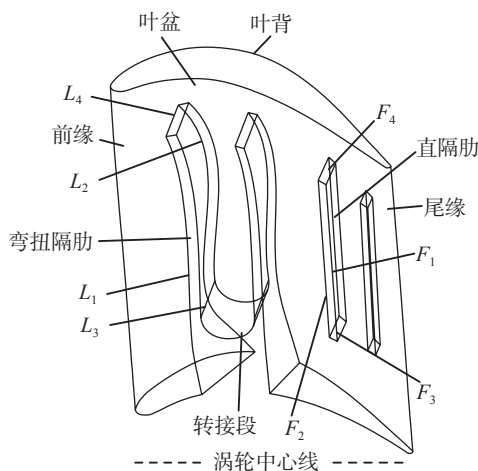


图2 涡轮叶片叶身内型示意图

Fig.2 Schematic diagram of inner part of turbine blade body

转接,满足建模要求(1);用工具片体裁剪基体生成转接段,故转接段前后表面一定为叶盆、叶背曲面的自然延伸,符合建模要求(2);建立工具片体的截面线与定位参考点的关联约束关系,解决了建模要求(3)。

2 涡轮冷却叶片转接段建模方法

转接段由工具片体裁剪基体产生,即工具片体为转接段的重要特征。工具片体是由截面线沿引导线通过曲线网格法生成。曲线网格法的原理是通过利用一

簇截面线和一簇引导线来构造曲面网格^[8]。该方法在本文中的具体体现:(1)创建具有完备约束的工具片体截面线 l_1 、 l_2 ,建立截面线 l_1 、 l_2 与定位参考点 P_0 的约束关系 K_1 、 K_2 ,解决工具片体草图的定位与关联问题;(2)将关联的草图截面线 l_1 、 l_2 作为原始曲线;(3)求取参考平面与隔肋侧面(已延伸)的相交边线 e_1 、 e_2 ,将其作为横截面曲线(即引导线);(4)建立横截面曲线 e_1 、 e_2 与隔肋侧面的位置和切矢的连续性关系,构造曲线网格,使放样生成的工具体面与曲线网格相匹配,解决转接段与隔肋侧面光滑转接的问题,如图4所示。

根据以上的叙述,可以看出此方法的关键是截面线的创建与约束。工具片体截面线是通过草图参考平面创建,与隔肋延伸面的边建立几何约束关系,与定位参

考点建立位置约束关系来完全控制该截面线,如图5所示。只需确定截面线的关键参数就可以确定转接段的关键建模参数,提取转接段的关键参数见表1。

由于转接段通常采用圆弧过渡,建立圆弧截面线草图,添加圆弧与隔肋边(前后参考平面裁剪延伸的隔肋侧面)的两个相切和圆弧起始端点为切点的约束关系后,只需要再确定一个约束关系便可完全定义圆弧,如图5所示。有多种方案可作为此约束关系,具体如下:

方案1。以圆弧半径值作为约束参数。因为弯扭隔肋的侧面与参考平面的交线为曲线,其曲率是变化的,用户输入准确的半径值比较困难,如图6(a)所示。

方案2。以圆弧圆心的 z 坐标,即圆弧圆心到 xoy 面的距离作为约束参数。此方法在实践中是可行的,可以通过改变 z 坐标改变圆弧的位置,如图6(b)、(c)所示。但 z 坐标来不能实现草图与基体的关联问题,当变更基体时,坐标系不会移动, z 坐标即不会变化,所以工

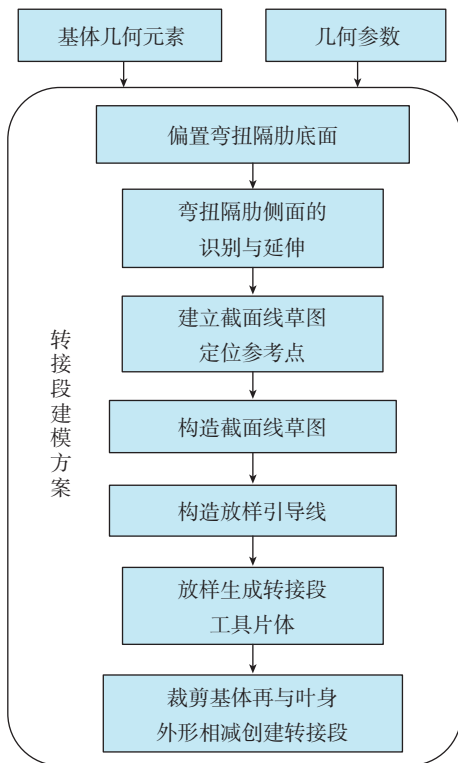


图3 转接段整体建模方案

Fig.3 Project design of transition section modeling

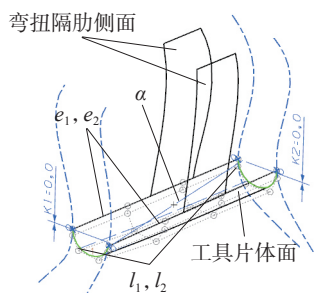


图4 曲线网格法示意图

Fig.4 Schematic diagram of curve mesh

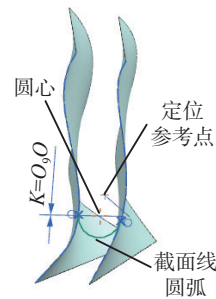


图5 截面线约束示意图

Fig.5 Schematic diagram of constraint section line

表1 转接段参数

Table 1 Switching section parameters

参数名	参数几何意义
n	转接段个数
Front_ K_i	叶盆侧圆弧圆心与定位参考点的 z 向距离 (i 表示转接段编号1,2,...)
Back_ K_i	叶背侧圆弧圆心与定位参考点的 z 向距离 (i 表示转接段编号1,2,...)

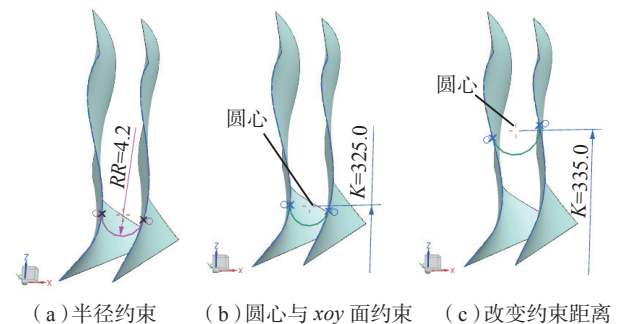


图6 约束方案

Fig.6 Project of constraint

具片体不能跟着变更。

若把截面线圆弧圆心与同基体关联的定位参考点作为约束变量,两者距离 K 为约束参数,如图5所示。可以通过更改距离 K 或者更改定位参考点的 z 坐标来改变圆弧的位置。由于点与基体关联,又与圆弧关联,所以圆弧与基体关联,解决了工具体不能跟随基体变更的问题。

根据用户确定的几何参数值,按照本文的约束方案创建截面线,对截面线沿引导线构造曲线网格即可完成转接段工具片体的建模。通过此方法创建工具片体来裁剪基体生成冷却叶片转接段:(1)解决了叶身变更时转接段不随着变更的关联问题;(2)可以较好地适应弯扭隔肋,满足与弯扭隔肋侧面 G^1 光滑转接的要求。本文已对此关联建模方法的原理作了介绍,下文对该方法是否满足 G^1 光滑转接给出了验证,并对隔肋侧面延伸中隔肋边的自动识别方法进行了说明。

2.1 关联建模方法的原理

关联是指事物内部之间具有相互约束的关系。关联设计的目的是为了更好实现自动响应设计模型的变更,提高设计效率。关联设计的关键问题在于解决相关约束在模型的零件之间,部件之间以及零件与部件之间的传递与求解^[9]。本文建模方法的关联设计原理是采用基于变量约束求解的方式,建立转接段与基体之间的关联。变量关联指在属于不同参数集的变量之间建立映射关系,当对一个变量修改后,对应的变量自动修改^[10]。下面对其作出数学上的解释:

对于参数化设计而言,其特征模型可以表示为:

$$M = \{M_i, P_i\} \quad (1)$$

式中, M 为设计所需特征模型, M_i 为组成模型的特征, P_i 为特征对应的参数集。

当引入尺寸控制的参数集 Q_i ,建立 Q_i 与 P_i 的映射关系 $P_i=f(Q_i)$,则特征模型可以表示为:

$$M = \{M_i, f(Q_i)\} \quad (2)$$

这就从数学上说明了其关联性,当新的参数修改时,由于映射关系 f 的存在必然会引起特征的更新。

本文规定:工具片体草图特征为 M ,其参数集为 P_0 ,建立的截面草图圆弧的定位特征点为 M_1 (该定位特征点为与叶身关联的特征点,可通过参数集里的 U 、 V 参数创建点在面上);然后建立圆弧的圆心与定位特征点的尺寸控制关系 Q_1 ,这便有了映射关系, $P_0=f(Q_1)$,当移动定位点时圆弧跟着移动,如图7所示,(其中, P_0 即表示图中的距离参数约束; Q_1 表示距离尺寸)。这便完成了工具片体与定位点的关联,同理定位点与叶身也具有关联的映射关系,所以叶身就与工具片体建立起了映射关系,完成了两者关联的目的。

2.2 G^1 光滑转接的验证

转接段是从隔肋侧面光滑转接到另一隔肋侧面。对于直隔肋,隔肋侧面为平面,朱谦等^[7]从数学角度给出了证明转接段两侧与相邻直隔肋侧面满足 G^1 连续的方法。而对弯扭隔肋而言,隔肋侧面同时存在弯、扭两种状态为自由曲面,此方法不再适用。由于曲面与曲面之间的连续性证明太过复杂,本文不作数学上的证明,而是利用UG系统的曲面连续性分析功能模块对该方法是否满足 G^1 光滑转接给出验证,并以直纹面放样方法的分析结果作了对比。本文利用同一组截面线圆弧,使用不同方法建立工具片体,裁剪基体生成转接段。以隔肋的侧面和转接段工具片体的面作为研究对象,对其进行曲面连续性分析,如图8所示,其中 G^0 、 G^1 误差最大值见表2。

通过以上分析可以看出通过曲线网格法的 G^1 最大值很接近0,可以保证冷却通道的 G^1 光滑转接,较好地

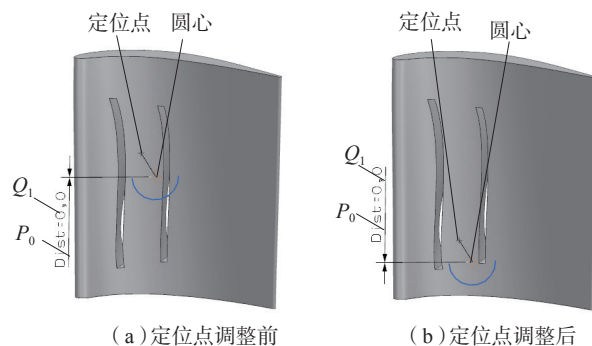


图7 定位点与截面线关联示意图

Fig.7 Schematic diagram of anchor points associated with section lines

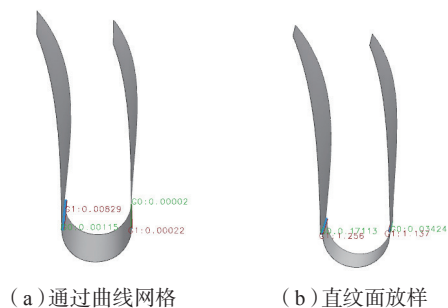


图8 G^1 连续性分析图

Fig.8 Analysis chart of G^1 continuity

表2 不同方案 G^0 、 G^1 误差对比表

Table 2 G^0 、 G^1 error comparison of different schemes

方案	G^0 最大值/mm	G^1 最大值/(°)
图8(a)	0.00115	0.00829
图8(b)	0.17113	1.256

适应弯扭隔肋。

2.3 隔肋边的自动识别

转接段建模方法需要对隔肋侧面延伸,来创建截面线的几何约束关系及创建引导线。对于隔肋侧面的延伸需要选取隔肋侧面的边 L_1 和 L_2 作为输入,这就需要对隔肋的边进行自动识别。由于曲面延伸算法较为复杂,此处只对输入进行识别,不对延伸算法做研究。

本文对造型系统的坐标系定义原点 O 在涡轮轴线上,叶高方向为 z 正向,叶盆指向叶背方向为 x 正向,则可按右手直角坐标系确定 y 正向。叶身截面平行于 xoy 平面,弯扭隔肋为若干平行于 xoy 平面的矩形截面线放样而成。对一个隔肋特征的侧面,如图 9 所示。将图 9 中的所有面和边与图 2 相对应,其中隔肋侧面 (F_1 或 F_2) 的 L_1 和 L_2 是需要的边。对隔肋边 L_3 和 L_4 ,可看做近似水平,去除近似水平的 L_3 和 L_4 ,得到近似垂直的 L_1 和 L_2 。

由于叶片冷却的需求,需要考虑转接段建立之前是否已经创建了扰流肋,扰流肋的创建会破坏隔肋边 L_1 、 L_2 的连续性,而具有多个端点。这时就需要得到 L_1 、 L_2 的 z 向最下面的那一段边线(图 9 中的所求边)。

隔肋边的自动识别:(1) 查询隔肋侧面 (F_1 或 F_2) 所有的边,可交互选择隔肋侧面作为查询的输入,进而查询出隔肋侧面所有的边,将所有边的 ID 存放到已创建的链表 S_0 中;(2) 遍历链表 S_0 ,查询具有两个端点的边,若边的两个端点构成的矢量单位化 z 向分量很小,则认为近似水平,从链表中删除其 ID,则余下的边可认为近似竖直;(3) 获取隔肋侧面 (F_1 或 F_2) 的包围盒,遍历所有近似竖直边,根据各条边与包围盒 y_{\max} 和 y_{\min} 的距离将竖直边分为两组,将 ID 存放到已创建的链表 S_1 和 S_2 中;(4) 若创建了扰流肋,则需要遍历步骤(3)中的链表 S_1 和 S_2 中的所有边线,获取 z 向高度最小的边的 ID,存放到链表 S_3 中;(5) 对链表 S_3 中的所有 ID 对应的边命名,便于后续使用。

3 转接段参数化建模实现

根据以上研究方法,本文用 VS 2008 (Visual Studio 2008) 作为开发工具,在 UG NX 7.5 平台上利用 UG/Open API 开发了涡轮冷却叶片转接段参数化建模模块,可实现转接段结构特征的快速建模和修改,并验证了该模块的通用性,建模实例如图 10 所示。

4 结论

本文对涡轮冷却叶片隔肋转接段特征进行了分析,提出了采用关联设计技术,通过曲线网格法生成工具片体裁剪基体创建转接段的方法,解决了以下问题:

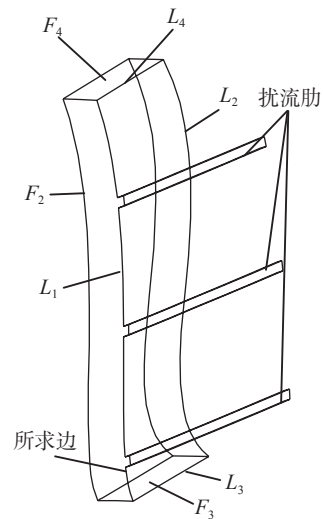


图9 带扰流肋的弯扭隔肋工具体示意图
Fig.9 Schematic diagram of rib tools with spoiler ribs

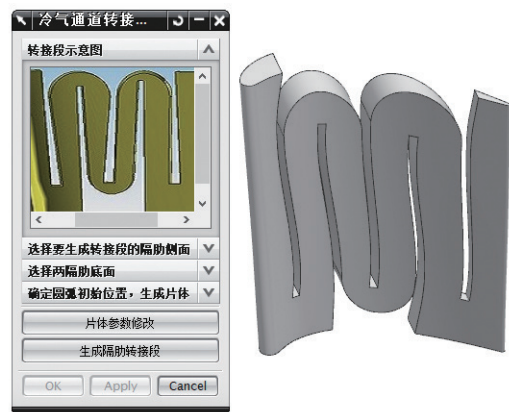


图10 转接段建模实例
Fig.10 Example of transition section modeling

(1) 通过转接段与基体的关联方法,解决了转接段无法自动与叶身变更相适应的问题。

(2) 基于曲线网格法创建工具片体,解决了转接段特征建模不能较好地适应弯扭隔肋的问题,且可以保证转接段与隔肋侧面的光滑连接。

(3) 提出了隔肋边的自动识别方法,有效提高了转接段的建模效率。

根据以上研究工作,基于 UG NX 7.5 平台开发了涡轮叶片转接段参数化建模模块,实现了适应弯扭隔肋的转接段快速建模与修改,验证了本文所提方法的有效性。该方法也为涡轮叶片其他复杂特征的建模提供了参考。

参考文献

[1] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机手册(第十册)[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

(下转第 87 页)

测量因素分析可以有效提高测量效率,减少噪点对测量结果的影响,以结构光技术为基础的测量设备是未来零件非接触三维测量发展方向之一。

参考文献

[1] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

LI Zhongwei. Three dimensional measurement technology and system research based on structured light of digital grating projection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[2] BLSIS F. Review of 20 years of range sensor development[J]. Proceedings of SP IEEE and IS and Telectronic Imaging, 2003, 5013(1): 228-240.

[3] 王亚元. 基于数字摄影的光学三维测量技术 [J]. 工具技术, 2005, 39(12): 62-63.

WANG Yayuan. Optical 3D measurement technology based on digital photography[J]. Tool Engineering, 2005, 39(12): 62-63.

[4] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌 [J]. 厦门大学学报 (自然版), 2014, 43(1): 50-53.

LU Jinren, HUANG Yuanqing. Laser triangulation method for surface measurement[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2014, 43(1): 50-53.

[5] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 24(S3): 601-604.

WANG Xiaojia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the Laser Triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 24(S3): 601-604.

[6] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[7] 吕乃光, 孙鹏, 姜小平, 等. 结构光三维视觉测量关键技术的研究 [J]. 北京信息科技大学学报, 2010, 25(1): 1-5.

LÜ Naiguang, SUN Peng, LOU Xiaoping, et al. Key techniques for 3-D structured light photogrammetry[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2010, 25(1): 1-5.

[8] 罗先波, 钟约先, 李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44(8): 1104-1106.

LUO Xianbo, ZhongYuexian, LI Renju. Data registration in 3D scanning system[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(8): 1104-1106.

[9] BESL P J, MCKAY N D. A Method for registration of 3D shape[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[10] CHEN Y, MEDIONI G. Object modeling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145-155.

通讯作者: 刘新宇, 硕士, 工程师, 研究方向为几何量检测, E-mail: lxy_rainman@163.com.

(责编 大漠)

(上接第 82 页)

Editorial Board of Aircraft Engine Design Manual. Aircraft engine design manual (Volume 10) [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

[2] 史振. 燃气涡轮叶片复合冷却结构参数化设计与数值研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

SHI Zhen. Parametric design and numerical research of gas turbine cooling structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[3] 杨炯, 席平, 胡毕富, 等. 适应弯扭肋的涡轮叶片多种种流肋造型方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 775-781.

YANG Jiong, XI Ping, HU Bifu, et al. Multi-type ribs of turbine blade modeling method fitting bowed-twist wall[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(6): 775-781.

[4] 张宝源, 席平, 杨炯. 复合弯扭涡轮叶片尾缝的快速建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 48-53.

ZHANG Baoyuan, XI Ping, YANG Jiong. Rapid modeling of trailing edge slots in bowed-twisted turbine blade[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1): 48-53.

[5] 李吉星, 席平. 涡轮叶片导管快速建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1149-1155.

LI Jixing, XI Ping. Rapid modeling of impingement pipe in turbine blade[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(6): 1149-1155.

[6] PÉREZ-ARRIBAS F, TREJO-VARGAS I. Computer-aided design of horizontal axis turbine blades[J]. Renewable Energy, 2012, 44: 252-260.

[7] 席平, 朱谦, 张宝源. 涡轮叶片冷气通道转接段的特征分析及建模 [J]. 图学学报, 2012, 33(4): 37-41.

XI Ping, ZHU Qian, ZHANG Baoyuan. Feature analysis and modeling of cooling passages transition section in turbine blade[J]. Journal of Graphics, 2012, 33(4): 37-41.

[8] 夏禹. 涡轮叶片造型 CAD 系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

XIA Yu. The research on turbine blade CAD modeling system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.

[9] 徐波, 李建军, 张祥林, 等. 基于关联设计的弯曲级进模结构 CAD 方法研究 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12(3): 83-87.

XU Bo, LI Jianjun, ZHANG Xianglin, et al. Research on the CAD method of bending die structures in progressive dies based on associated design[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(3): 83-87.

[10] 邱立业. 基于 NX 的级进模设计变更管理 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

QIU Liye. Progressive die design change management based on NX[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

通讯作者: 赵晓慈, 博士, 实验师, 硕士研究生导师, 主要研究方向为数字化设计与虚拟仿真技术, E-mail: skyzh@buaa.edu.cn.

(责编 大漠)